

テレグジスタンスの研究 第 64 報

- 身体の離脱感覚、帰属及び定位に関する検証実験 -

Study on Telexistence LXIV

- verification experiments about out of body sensations, attribution and localization -

渡邊孝一¹⁾, 舘暲¹⁾

Kouichi WATANABE and Susumu TACHI

1) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

(〒 223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1, {kouichi, tachi}@tachilab.org)

Abstract : To enhance a realistic sensation and a presence of human in telexistence system, it is important not only to conform an audio-visual sensation of operator with robot but also to conform an embodiment of operator with robot by reflecting a somatic sensation of operator. However, in present telexistence, key factors for conforming an embodiment of operator with robot is unclear and evaluation method of it also has not been established. In this paper, we experiment about out of body sensations in the telexistence system based on the previous work.

Key Words: *Telexistence, Self-localization, Self-attribution.*

1. 序論

我々はテレグジスタンスシステムを実現するための研究を進めており、その過程においてマスタとロボットとの間で感覚情報のやりとりを行うことでテレグジスタンスを可能とするテレグジスタンスマスタスレーブシステムを多く開発してきた [1, 2]. これらのシステムを利用し、どのようにして高い臨場感を得て高い存在感を与えることが出来るのかを検討し、臨場感や存在感といったいわば抽象的な感覚に対する定量的な解析を進めている。

テレグジスタンスマスタスレーブシステムでは、人間がロボットを介して遠隔の空間に存在することが可能となる。人間が遠隔に存在すること、それに係る臨場感や存在感について掘り下げて考える際には、人間の“身体的感覚”が重要な要素になると考える。自分がこの場にいるという身体的な感覚、自身の身体が遠隔の空間に定位して紛れもなく自分であるという帰属意識が成立してこそ、臨場感や存在感が生まれる。こういった人間の身体的感覚を意図的に制御する手法があれば、高い臨場感や存在感といったもので表されるテレグジスタンスの“質”を高めることが出来るであろう。ここでは、これまで視覚や聴覚、触覚といった感覚に注目して行われてきた臨場感や存在感を高めるアプローチを、身体的感覚の観点から見ていきたい。

体外離脱を引き起こす実験を行ない身体感覚を肉体から引き離すことに成功している研究例がある [3, 4]. 彼らはどちらも、作り物の手を自身の手と錯覚する現象 Rubber hand

illusion (RHI) に基づき、その現象を身体に拡張している。RHI と同様に、同期した視覚刺激と触覚刺激を被験者の実身体と被験者が見ている視界下部のバーチャル身体へ与えることで実身体からバーチャル身体へ身体的感覚の定位を試みている。

そこで我々も先行研究の手法に基づいて、ロボットを利用した環境下にて身体的感覚の遠隔定位が多感覚への特定の刺激により可能となるかどうかを検証する。本研究は、人間の“身体的感覚”の制御手法を明らかにするための知見を得ることを目的としており、本稿ではそのための初期評価として、先行研究を追実験し刺激の条件を変えてその影響を調べる。それによって、先行研究の現象がテレグジスタンス環境下で適用可能であるかどうかを検討する。

2. 身体の自己定位・自己帰属に関する先行研究

ここでは、先行研究として以下の 2 つの論文の概略を紹介する。先行研究 [3, 4] は共に、RHI の知見を利用し、それを身体に拡張することで体外離脱の錯覚を生じさせる実験を行っている。RHI とは、被験者の目の前に作り物のゴムの手を置いて被験者の手を隠し、ゴムの手と隠した手を同期的に刺激することで、目の前のゴムの手があたかも自分の手のように感じる現象である。これまで身体の一部のみを対象領域としていたものを身体全体に適用しようというのが彼らの検証である。

[3] では、HMD を被った被験者の後ろにカメラを置いて

自身の背中を立体視出来る状況とした上で2つのロッドで被験者自身の胸とカメラの真下にあるバーチャルな被験者の胸を同時に叩く。2分間の刺激の後に、10の設問（3つが錯覚に関係した設問、他の7つが対照設問である）に答えさせたところ、錯覚を強く感じたという結果を得ている。それらを物理的に検証するため、脅威刺激を与えた場合の皮膚伝導抵抗 SCR を、刺激が同期的な場合と非同期的な場合に分けて記録した結果として、同期的な刺激では強い SCR を観察したが非同期的な場合は観察できていない。それらの結果より彼らは、身体の帰属定位には視覚及び触覚に対して同期的な刺激を与えることによって成立するとしている。同様に、[4]も同様な環境下にて、1分間の同期／非同期刺激を与えて、その結果として身体の帰属定位がカメラ側に生じるかどうかを調べている。先の実験との違いは、刺激箇所が胸ではなく背中である点と、刺激後の物理的な検証には被験者自身の移動シフト（刺激後に被験者を別の位置まで誘導し元の位置に戻る指示を与えた際の、初期位置からカメラ方向へのズレ）を計測していることである。彼らも10の設問による計測を同時に行なっているが、設問及び移動シフトそれぞれの結果から先の実験と同様に同期的な刺激に置いてのみ錯覚が強く現れることを報告している。彼らはまた、見えている身体形状による違いも観察し、見えているものが人間の形状の場合により強い錯覚が生じるとしている。

これらの先行研究から、自分自身を視認できる環境下で第三者によって視覚及び触覚に対して同期的／非同期的な刺激を与えられることによって実身体とバーチャル身体との間で身体の帰属・定位を変更可能であると言える。

3. 身体の自己定位・帰属検証

先行研究の身体性検証実験に基づき、先行研究の結果を追実験しつつトレイグジスタンスの環境下でその現象が適用可能であるかどうかを検証するための実験を行う。

3.1 検証の方式

本研究では、最初に先行研究の現象を我々の実験環境下で同様の条件を与えて追実験し、その効果を確認する。その後、トレイグジスタンス環境ならではの状況下にて身体的な感覚の定位に寄与するパラメータの検討を行う。特に刺激を与える主体に着目し、刺激主体の条件や方式を検討し、最終的に臨場感や存在感へどういった寄与を及ぼすのかを検討する。本稿では、手順の最初として、先行研究の現象を我々の実験環境下で追実験し、トレイグジスタンスへの適用可能性を探るとともに続く実験のためのパラメータや傾向の知見を得る。

本実験における我々の検証の特徴は、刺激を与える主体として人間が仲介せず機械の自動駆動若しくは遠隔操作による刺激によっても同様な効果が誘発されるかどうかを見るところである。従来の研究では、実験者が直接被験者に刺激を与え、それが視認できる環境下であった。しかしながら、トレイグジスタンスを想定した場合には、マスタ側

及びスレーブ側に他の人間が居なくとも、操縦者に対して身体の離脱及びロボット側への帰属・定位を生じさせる必要がある。そこで、刺激を与える主体が人間でない場合、すなわち第三者が介入しない条件において帰属・定位の効果を検討する。加えて、先行研究では同期／非同期といった刺激の与え方により帰属・定位の成否が決定された。本稿でも同様な同期／非同期刺激による効果を観察し、刺激の同期／非同期の影響も合わせて観察する。

3.2 検証実験の環境設定

実験環境の構成図を図1に示す。カメラを被験者の後方1.5[m]の位置に置いて被験者はHMDを介してカメラの映像を見る。実験者は刺激用のロッドを手を持って被験者の横に控え、被験者の胸部及びカメラの下方領域を突く。特定の刺激動作条件を設定し、各動作条件で一定時間の刺激を行った後に被験者へ設問の回答を指示する。

被験者側及びカメラ側の刺激用ロッドはそれぞれ予め力覚提示デバイス PHANToM Omni (SensAble technologies) に取り付けられ、実験者は PHANToM とともにロッドを把持して実験を遂行する。2台の PHANToM へは予め決定しておいた動きの軌道を与えて追従するように動作させ、2台ともに1台のPCにより制御することで時間遅れ等は除去している。カメラには、腰部より上方の頭部6自由度運動を再現可能な視覚的トレイグジスタンスシステムのスレーブロボットヘッドを利用し、制御は行わずに完全に静的システムとして両眼カメラからの映像のみ利用する。ロボットヘッドの高さは被験者と一致するようにしてある。HMDは1024x768 [pixel]の高解像度を有し、画角42[度]、更新レート30 [ms]の性能を持つ自作HMDを利用した。これはロボットヘッドとのパラメータ調整を行っており、自然な立体視が可能となっている。

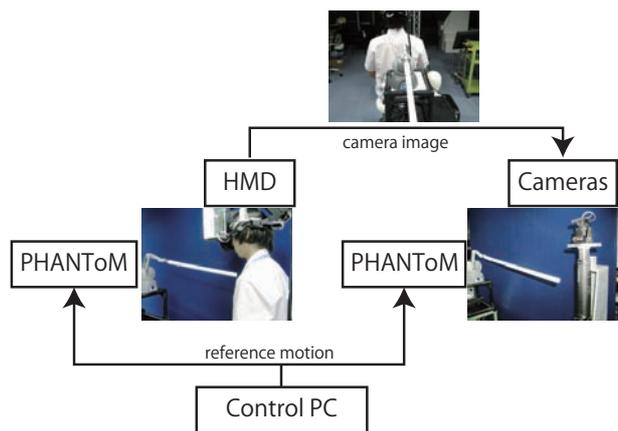


図1: Experimental system environment.

3.3 検証実験の実験条件

刺激の運動条件として以下の通り6つのモードに分類する。

- Sync, 2 passive rods
- Async, 2 passive rods
- Sync, 1 passive / 1 active rods



Sync/Async, 2 passive rods



Sync/Async, 1 passive / 1 active rods



Sync/Async, 2 active rods

図 2: Experimental modes.

- Async, 1 passive / 1 active rods
- Sync, 2 active
- Async, 2 active

Sync, 2 passive rods 及び Async, 2 passive rods は実験者が被験者の横に立ち、実験者自身が二つの刺激用のロッドを両手にそれぞれ持って被験者の実身体及び被験者のバーチャル身体を突く。Sync では二つのロッドを全く同じ周期・位相で同期的に、Async ではロボット側のロッドにランダムな位相信号を加えて非同期的に突く。これら二つのモードは、先行研究の実験条件と同じ刺激動作を想定している。Sync, 1 passive / 1 active rods 及び Async, 1 passive / 1 active rods は実験者が被験者の横に立ち、被験者側のロッドのみを持って被験者の実身体を突く。この時、ロボット側のロッドはプログラムにより PHANToM が自動駆動することによって被験者のバーチャル身体を突く。被験者は目の前に見える自身が実験者により突かれているのが見えている状態で、バーチャル身体は自動で動くロッドにより突かれているように見えている。上記二つのモードと同様に、Sync は同期的に Async は非同期的に動く。Sync, 2 active 及び Async, 2 active は実験者が被験者の視界から離れ、二つのロッドは完全にプログラムされた PHANToM により自動駆動し、被験者の実身体及びバーチャル身体を突く。両者の違いは、上の四モードと同様である。これらの違いを示した実験風景を図 2 に示す。

刺激の提示時間は 60 [sec]、同期条件の刺激の動作周期は 1 [Hz]、非同期条件の刺激の動作周期は基本を 1 [Hz] としそこにランダムな位相を加えた信号を生成し、PHANToM に与える。

主観評価設問として、図 3 及び図 4 に示す 10 個の設問を設定し、各刺激後に被験者に回答してもらう。図 3 に示す最初の設問 3 つは錯覚設問で、ロボットヘッド側に帰属及び定位が生じた場合に得点が高くなる。一方、図 4 に示す後半の設問 7 つは対照設問で、帰属定位が生じた場合には点数が低くなるように選定してある。この設問は、先行研究 [3] のものと同一とし、現象の対比を行いやすくした。

具体的な実験の手順を以下に示す。

1. 実験者は被験者にシステム構成を説明

2. 被験者は HMD を被る
3. 被験者はロボットヘッドと同じ姿勢をとる
4. 実験者は PHANToM の動作に従い、6 つのパターンに応じてロッド把持/非把持を変えて被験者の首部位及びロボットヘッドカメラの下部を突く
5. 60sec の刺激後、主観設問 10 問に答えさせる

上記 2~6 を先に述べた 6 モードでそれぞれ試行する。被験者は 20 歳代の男女 5 名とした。

No.	Question
Q1	I experienced that I was located at some distance behind the visual image of myself, almost as if I was looking at someone else. 自分が他の誰かを見ているかのように、自分の（後姿の）映像より後ろに離れた位置に居るように体感した
Q2	I felt as if my head and eyes were located at the same place as the cameras, and my body just below the cameras. 自分の頭や目がカメラのある場所であり、自分の胴体がカメラの真下にあるように感じた
Q3	I experienced that the hand I was seeing approaching the cameras was directly touching my chest (with the rod) 実際に見えていたカメラに近づく棒が、直接自分の胸を突いているように体感した

図 3: Illusion statement.

No.	Question
Q4	I felt that I had two bodies. 二つの身体があるかのように感じた
Q5	I experienced that my (felt) body was located at two locations at the same time. 同時に二つの場所に自分の身体があるかのように体感した
Q6	I experienced a movement-sensation that I was floating from my real body to the location of the cameras. カメラのある場所へ自分の身体が浮遊していくような移動感を体感した
Q7	I felt as if my head and body was at different location, almost as if I had been decapitated. まるで首を切り落とされたかのように自分の頭と胴体が別の場所にあるように感じた
Q8	I did not feel the touch on my body but at some distance in space in front of me. 自分の身体を叩かれているようには感じず、前方の少し離れた空間で叩かれているように感じた
Q9	I could no longer feel my body, it was almost as if it had disappeared. もはや自分の身体を感じる事が出来ず、殆ど見えなくなったようだった
Q10	The visual image of me started to change appearance so that I became (partly) transparent. 自分の映像が外観を変え始めたので、自身が一部透明になったように感じた

図 4: Control statement.

3.4 検証実験の結果

検証実験の結果を図 5 及び図 6 に示す。図 5 は各モードの同期刺激による結果を示しており、図 6 は非同期刺激による結果を示している。本実験は、被験者が 5 名とそれほど多くないため、統計的検証による結果検証は行わなかった。

結果より、同期刺激にて錯覚設問として設定した Q1-3 の設問の回答値が大きく、他の対照設問が小さく現れている

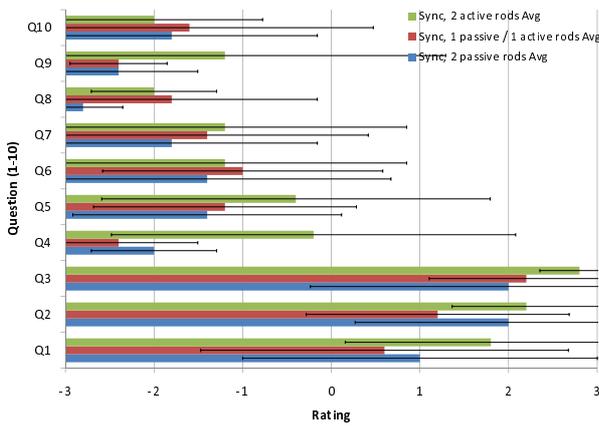


図 5: Experimental result : Synchronous.

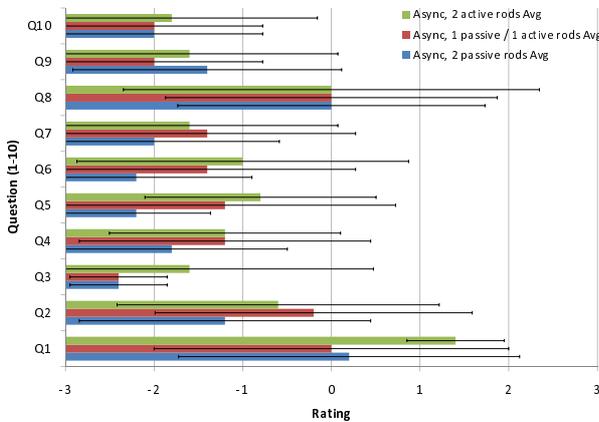


図 6: Experimental result : Asynchronous.

ことがわかる。一方で、非同期刺激では同期刺激と比べるとすべての設問の回答値が小さく、これらは先行研究の結果と一致している。また、各モード間での設問間の傾向にそれほど大きな差は見られず、刺激を与える主体が人間でも PHANToM でも、それが混在するような刺激の与え方に依らず同様な身体への帰属・定位が生じることを示している。

個々の結果について考察を行う。同期刺激の結果では、全体的に Sync, 2 active rods モードの点数が高い。錯覚設問については好ましい結果であるといえるが、対照設問の Q5 や Q6 に対する点数が高めに現れている点に注意したい。この設問は、自身の身体を 2 箇所を感じるかどうかを問うもので、実験者など自分以外の人間が写り込んでいない場合に、自分自身の帰属定位を見失う傾向があるように見える。非同期刺激の結果では、錯覚設問 Q1-Q3 の点数は抑えられているものの、Q1 の点数が他に比べて高い。これは、設定した実験環境のうち、ロボットヘッドと HMD の構成が視覚的テレグジスタンスに最適となるよう設定されているため非常に自然な立体視を実現しており、刺激の同期性に依らず臨場感が高まっている可能性を示唆している。すな

わち、触覚刺激は非同期にもかかわらず映像の立体感によって Q1 の得点を引き上げたと考える。さらに、設問 8 の得点が他に比べて高い。これは非同期的な刺激であるがゆえに、視覚的（接触したと感ずる瞬間の）刺激の時間と実際に被験者の実身体が叩かれたタイミングがずれているため、結果的に離れた場所で叩かれているように感じていると推測される。しかしながら、同期刺激においては非常に小さな点数が得られていることから、同期した場合には空間の隔たりを感じず非同期の時のみ空間の隔たりを感じてことを示しており、触覚刺激が加わる瞬間において視覚刺激が加わる空間位置を自身の身体とみなしていると考えられる。どの議論においても、サンプル数が十分ではないため、これらを裏付ける検証がさらに必要である。

4. 結論

本稿では、テレグジスタンスにおける臨場感や存在感を制御する要因として、実身体とバーチャル身体への同期的刺激によりバーチャル身体への身体的感覚の帰属・定位が生じる現象に着目し、体外離脱を促す先行研究の事例に倣ってその効果を検証した。結果として、先行研究に見られるような錯覚状態の誘発が確認され、それは刺激を与える主体が人間でなくても可能であることが分かった。従って、テレグジスタンス環境下での適用可能性が示唆されたとと言える。今後は、ロボットへのテレグジスタンス環境下で、自身を自身への刺激主体とした場合に生じる身体帰属・定位の影響について検討し、臨場感や存在感の制御要因を明らかにするだけでなくとどまらず、人間の身体的感覚の定量的評価手法の確立へ踏み込んでいきたい。

謝辞 本研究の一部は戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Susumu Tachi, Naoki Kawakami, Hideaki Nii, Kouichi Watanabe, and Kouta Minamizawa. Telesar-phone: Mutual telexistence master-slave communication system based on retroreflective projection technology. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 1, No. 5, pp. 335-344, 2008.
- [2] 渡邊孝一, 竹下佳祐, 佐藤克成, 南澤孝太, 舘暉. テレグジスタンスの研究 (第 61 報) -telesar3 システムの提案と構築-. 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomec2010), pp. 1A1-F28, 2010.
- [3] H. Henrik Ehrsson. The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, Vol. 317, p. 1048, 2007.
- [4] Bigna Lenggenhager, Tej Tadi, Thomas Metzinger, and Olaf Blanke. Video ergo sum : Manipulating bodily self-consciousness. *Science*, Vol. 317, pp. 1096-1099, 2007.